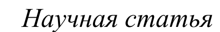
МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE







УДК 621.791.052:539.4.014.11
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-1-41-54

Научная статья



Оценка появления начальных разрушений от концентраторов напряжений в сварных соединениях и элементах конструкций



К.А. Молоков[1, 2] ✉, В.В. Новиков[1], М. Дабалез[1]
[1] Дальневосточный федеральный университет, Российская Федерация, г. Владивосток, ул. Суханова, 8
[2] Владивостокский государственный университет, Российская Федерация, г. Владивосток, ул. Гоголя, 41
✉ Spektrum011277@gmail.com

Аннотация
Введение. Данные о возникновении начальных разрушений, полученные испытаниями на стандартных образцах, не всегда можно экстраполировать на реальные сварные соединения и конструкции. Это обусловлено отличиями концентраторов в соединениях, т. к. после сварки возникает значительная структурно-механическая неоднородность зоны термического влияния и концентраторов напряжений. Протяженные, глубокие концентраторы рассматриваются как трещиноподобные дефекты, в вершинах которых образуется объемное, сложное напряженное состояние. Решается вопрос построения критических диаграмм начала возникновения предельного состояния в вершине концентратора, которое зависит от уровня внешней нагрузки и теоретического коэффициента концентрации.
Материалы и методы. Для исследования напряженного состояния задействовали аналитические методы. Проанализирована литература по теме. Учтены особенности проверенных физических моделей и закономерности поведения материалов. Характеристики сплавов стали взяты из открытых источников и обобщены в виде таблицы. Нелинейные уравнения решались в прикладных программах Matlab. Построенные авторами диаграммы позволяют отследить корреляцию опасного уровня теоретического коэффициента концентрации напряжений и уровня внешней нагрузки. Для оформления графической части работы использовали Curve Fitting Toolbox Matlab.
Результаты исследования. Дана характеристика разрушений от концентраторов напряжений в сварных соединениях. Наглядно показано развитие трещин в зоне сплавления. Указаны условия, стимулирующие и тормозящие разрушение. Определен теоретический коэффициент концентрации напряжений α_T. Показано, каким образом данный показатель зависит от ширины, высоты шва и от толщины свариваемой детали. Рассмотрены острые концентраторы напряжений с теоретическим коэффициентом концентрации $\alpha_т = 5 \dots 14$ и более. Для этого случая приводится аппроксимирующая формула, которая учитывает максимальное напряжение в концентраторе в первом полуцикле, исходную деформацию и коэффициент асимметрии цикла нагружения. Через эти элементы задается показатель повышения максимальных напряжений в зависимости от числа циклов нагружения. Аналитически показаны условие текучести, напряженное состояние и коэффициент перенапряжения, учитывающий повышение первого главного напряжения для сложного напряженного состояния. Описана модель критического состояния в вершине острого макроконцентратора напряжений. Она представлена как зависимость относительных напряжений зарождения разрушения $\sigma_н^{bc}/\sigma_{0,2}$ от концентратора. Проанализированы возможные вариации этой модели. Представлены зависимости относительных значений $\sigma_H^{bc}/\sigma_{0,2}$ от теоретического коэффициента концентрации $\alpha_T^{bc} = \alpha_T$. Для проверки физической адекватности данной модели построены графики, которые отражают изменения относительного напряжения внешней нагрузки при критическом состоянии в вершине концентратора напряжений. Обоснована неизбежность бифуркации как результата исследуемых процессов. Указаны два направления дальнейшего развития событий: хрупкое разрушение и потеря устойчивости напряженного состояния с переходом к росту пластических деформаций. Момент бифуркации определен как критическое состояние в очаге концентратора.

Обсуждение и заключения. Анализ и расчеты, выполненные в рамках представленной научной работы, позволили, в частности, сделать выводы о роли ключевых факторов исследуемых процессов. Установлено, например, что работа сплава стали при высоком теоретическом коэффициенте концентрации напряжений зависит от характеристик напряженного состояния. При жестком состоянии возможно сдерживание сдвиговой деформации и наступление предельного состояния при меньшем значении теоретического коэффициента концентрации напряжений. При обычной прочности стали (в сравнении с высокой) фиксируется большее влияние объемности напряженного состояния на значение теоретического коэффициента концентрации напряжений. Вероятность разрушения зависит от сопротивляемости материала росту макротрещины. В будущих изысканиях возможно уточнение аналитических моделей и результатов, оценка эффективных коэффициентов концентрации напряжений.

Ключевые слова: сварное соединение, теоретический коэффициент концентрации, дефекты сварных соединений, объемное напряженное состояние, концентрация напряжений, предел текучести, макротрещина.

Благодарности. Авторы выражают признательность сотрудникам департамента морской техники и транспорта ДВФУ за консультативную помощь в разработке темы, а также рецензентам за ценные замечания по структуре рукописи.

Для цитирования. Молоков К.А., Новиков В.В., Дабалез М. Оценка появления начальных разрушений от концентраторов напряжений в сварных соединениях и элементах конструкций. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2023;23(1):41–54. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-1-41-54

Original article

Evaluation of the Occurrence of Initial Failures from Stress Concentrators in Welded Joints and Structural Elements

Konstantin A Molokov[1,2] ✉, Valery V Novikov[1], Mohammad Dabalez[1]
[1]Far Eastern Federal University, 8, Sukhanova St., Vladivostok, Russian Federation
[2]Vladivostok State University, 41, Gogoleva St., Vladivostok, Russian Federation
✉ Spektrum011277@gmail.com

Abstract
Introduction. Data on the occurrence of initial failures obtained through testing on standard samples cannot always be extrapolated to real welded joints and structures. This is due to the difference between the concentrators in the joints, because after welding there is a significant structural and mechanical heterogeneity of the heat-affected and stress concentrator zone. Extended, deep concentrators are considered as crack-like defects, at whose vertices a volumetric, multiaxial stress state is formed. The paper addresses the issue of constructing critical diagrams of the onset of the limiting state at the concentrator vertex, which depends on the level of external load and the theoretical concentration coefficient.
Materials and Methods. Analytical methods were used to study the stress state. The literature on the topic was analyzed. The features of proven physical models and patterns of behavior of materials were taken into account. The characteristics of steel alloys were taken from open sources and summarized in a tabulated form. Nonlinear equations were solved in Matlab applications. The diagrams constructed by the authors enable to track the correlation of the dangerous level of the theoretical stress concentration factor and the level of external load. Curve Fitting Toolbox Matlab was used to design the graphic part of the work.
Results. The characteristic of damage from stress concentrators in welded joints was given. The crack propagation in the fusion zone was shown. The conditions stimulating and inhibiting destruction were indicated. The theoretical stress concentration factor α_T was specified. It was shown how this indicator depended on the width, the height of the seam and the thickness of the welded part. Acute stress concentrators with theoretical concentration factor $\alpha_т = 5 ... 14$ and more were studied. For this case, an approximating formula was given that took into account the maximum stress in the concentrator in the first half cycle, the initial deformation, and the load ratio. Through those elements, an indicator of an increase in maximum stresses was set depending on the number of loading cycles. The flow condition, the stress state, and the overvoltage factor, which took into account the increase in the first principal voltage for a combined stress state, were analytically shown. A model of the critical state at the apex of an acute stress macro concentrator was described. It was presented as the dependence of the relative stresses of the initiation of destruction $\sigma_н^{bc}/\sigma_{0,2}$ on the concentrator. Possible variations of this model were analyzed. The dependences of relative values $\sigma_H^{bc}/\sigma_{0,2}$ on the theoretical concentration factor $\alpha_T^{bc} = \alpha_T$ were presented. To check the physical adequacy of this model, graphs were constructed

that reflected changes in the relative stress of the external load at a critical state at the stress concentrator apex. The inevitability of bifurcation as a result of the studied processes was validated. Two directions of further development of events were indicated: brittle destruction and loss of stability of the stressed state with the transition to an increase in plastic deformations. The moment of bifurcation was defined as a critical state in the focus of the concentrator.
Discussion and Conclusion. The analysis and calculations performed within the framework of the presented scientific work enabled, in particular, to draw conclusions about the role of key factors of the processes under study. It was established, for example, that the operation of a steel alloy at a high theoretical stress concentration factor depended on the characteristics of the stress state. In a rigid state, it was possible to inhibit shear deformation and the onset of the limiting state at a lower value of the theoretical stress concentration factor. With the usual strength of steel (in comparison to high), a greater impact of the volume of the stress state on the value of the theoretical stress concentration factor was recorded. The probability of failure depended on the resistance of the material to the growth of a macrocrack. In future research, it is possible to refine analytical models and results, evaluate effective stress concentration factors.

Keywords: welded joint, theoretical concentration factor, defects of welded joints, volumetric stress state, stress concentration, yield strength, macrocrack.

Acknowledgements. The authors would like to thank the staff of the Department of Marine Engineering and Transport, FEFU, for their advisory assistance in the research into the topic, as well as to the reviewers for valuable comments on the structure of the manuscript.

For citation. Molokov KA, Novikov VV, Dabalez M. Evaluation of the Occurrence of Initial Failures from Stress Concentrators in Welded Joints and Structural Elements. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2023;23(1):41–54. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-1-41-54

Введение. Статическая и усталостная прочность снижается из-за дефектов сварных соединений. Это могут быть:

– трещины, образовавшиеся во время или после сварки;

– концентраторы напряжений (подрезы, несплавления, поры, сварочные кратеры, высокая чешуйчатость, резкое изменение формы шва, наплывы и др.).

В последнем случае определяющими будут:

– форма, размер концентратора и положение в сварном соединении;

– показатель напряженного состояния в вершине [1].

При циклических нагрузках в сварных соединениях часто возникают и развиваются трещины, спровоцированные концентраторами напряжений [2]. Риск зависит еще и от того, насколько напряженное состояние сварного соединения с концентратором близко к возникновению макротрещины и распространению ее при рабочих σ_H и циклических нагрузках σ_{-1}. Очевидно, что последнее существенно зависит от размеров, формы макродефекта и напряженного состояния в его вершине. Например, продолговатый и узкий макроконцентратор напряжений опаснее, чем округлый. Вероятно, в его вершине сразу образуется трещина, и вместе с ней исходный концентратор будет представлять одну длинную макротрещину [3]. Величина такой «общей» макротрещины может оказаться критической, что снизит статическую прочность [4]. Это зависит от ее длины и механических характеристик материала в вершине исходного концентратора.

Цель исследования — разработка аналитической модели оценки опасного уровня концентрации напряжений. Речь идет об образовании трещины в вершине концентратора, резком снижении несущей способности сварных соединений и деталей конструкций.

Материалы и методы. Научные изыскания в рамках заявленной темы базировались на известных физических моделях и закономерностях поведения материалов. Проанализирована теоретическая и прикладная литература. Из источников извлечены иллюстративные и справочные материалы.

Напряженное состояние исследовалось аналитическими методами. Выявлялась взаимосвязь жесткости напряженного состояния и величины теоретического коэффициента концентрации напряжений. Результаты представлены в виде диаграмм. Такой способ визуализации дает возможность отследить корреляцию опасного уровня внешней нагрузки и теоретического коэффициента концентрации напряжений.

Для проверки результатов расчетов по физической адекватности авторской модели строились графики зависимостей для критического состояния. В работе использованы сведения о широко распространенных конструкционных сталях феррито-перлитного класса в состоянии поставки (сталь 10, 22К, 50, Ст3сп, 37ХН3А, 30ХГСА и др.). Их механические характеристики получены из открытых источников[1] и обобщены в таблице 1. Данные визуализировали в Curve Fitting Toolbox Matlab.

[1] Сергеев Н.Н., Сергеев А.Н. *Механические свойства и внутреннее трение высокопрочных сталей в коррозионных средах*. М., Вологда, 2020. 431 с.

Таблица 1

Характеристики сталей

Марка стали	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	m	φ_k
10	320	190	0,17	0,73
15Г	410	245	0,148	0,55
Ст3сп	450	270	0,16	0,71
22К	540	310	0,16	0,69
50	680	350	0,16	0,62
10ХСНД	540	390	0,132	0,71
37ХН3А	1014	743	0,12	0,6
30ХГСА	1750	1360	0,09	0,44

Для вывода формул задействовали математический аппарат. При решении нелинейных уравнений использовали пакет прикладных программ Matlab.

Результаты исследования

Характеристика разрушений от концентраторов напряжений в сварных соединениях. С начала 2000-х годов исследуются концентрации напряжений в сварных соединениях и конструкциях применительно к промышленным задачам [2–3, 5–9].

Примеры разрушений сварных соединений из-за концентрации напряжений приведены на рис. 1.

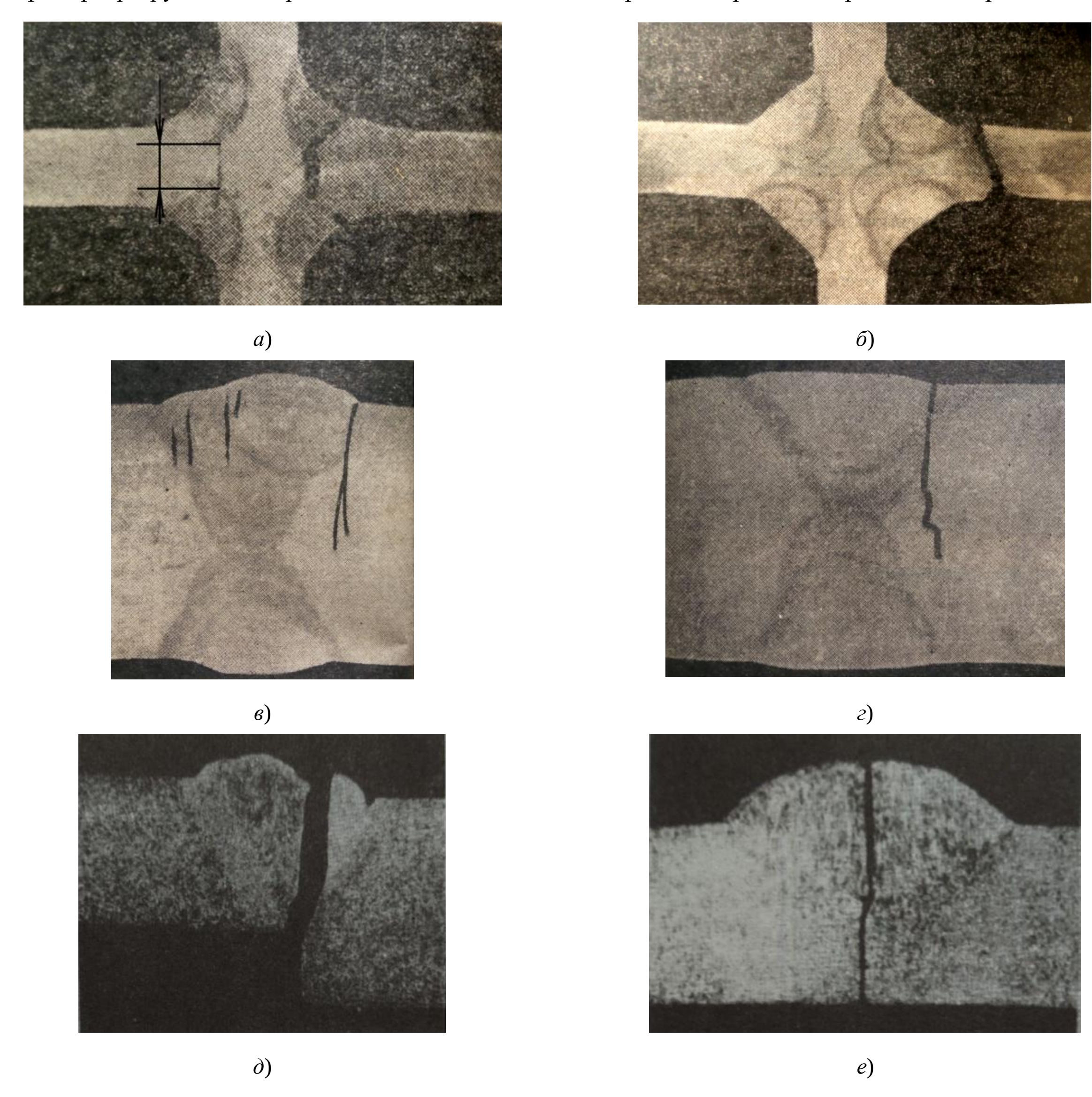


Рис. 1. Разрушения крестовых и стыковых соединений[2] от концентраторов напряжений: *а, е* — от зоны непроплавления, без разделки кромок; *б* — от подреза, с разделкой кромок; *в* — от резкого перехода в зоне сплавления; *г* — подрез; *д* — от концентратора, образованного ступенчатым переходом в стыке кромок [10]

[2] Молоков К.А., Новиков В.В., Турмов Г.П. Основы расчетного проектирования сварных конструкций. Владивосток, 2019. Т. 1. 204 с.

Разрушение крестовых соединений с большим непроплавлением кромок (обозначено стрелками на рис. 1 *а*) возможно при нагрузках:

– статических (в результате охрупчивания зоны сплавления);

– циклических (вызывают образование трещин в вершинах концентратора).

В [5] анализируется распределение напряжений для стыковых, угловых, крестовых соединений и прерывистых связей судовых конструкций. В стыковых и крестовых сварных соединениях особое значение имеет область основного металла, примыкающая к сварному шву. Это самое слабое сечение, определяющее прочность соединения при переменных напряжениях. Следует отметить, что швы всегда достаточно длинны по сравнению с толщиной металла и концентратором напряжения (подрезом в стыковом или крестовом соединении). Это препятствует сдвигу в области концентратора и создает двухосное, а чаще многоосное напряженное состояние [11, 12]. При рассмотрении разрушения сварных швов с концентраторами (рис. 1 *а, д, е*) учтем концепцию возникновения пластической деформации в области вершины [5, 7]. Кроме того, отметим, что концентраторы примыкают к зоне сплавления, которая после сварки испытывает продольные остаточные напряжения растяжения. Они влияют на степень жесткости напряженного состояния в очаге концентратора [1, 13–14]. Все это препятствует прохождению сдвига в очаге концентратора и может способствовать возникновению минимальной хрупкой макротрещины при высоком теоретическом коэффициенте концентрации напряжений $\alpha_т$ даже от статической нагрузки.

В [9] описаны показательные разрушения от сварных дефектов в трубопроводах большого диаметра. Установлено, что при длительной эксплуатации (более 20 лет) появляются трещины усталости в подрезах продольных сварных соединений труб. Трещины в подрезах в зоне сплавления, как правило, разветвляются и распространяются по двум направлениям (рис. 2): одна отдаляется от зоны сплавления, другая развивается по зоне сплавления (по шву). Это говорит о существенном влиянии механических, структурных характеристик материала[3] и механохимической неоднородности на процесс распространения начального разрушения [13, 14]. С другой стороны, разветвление трещины может затруднять процесс дальнейшего разрушения и переход трещины в магистральную.

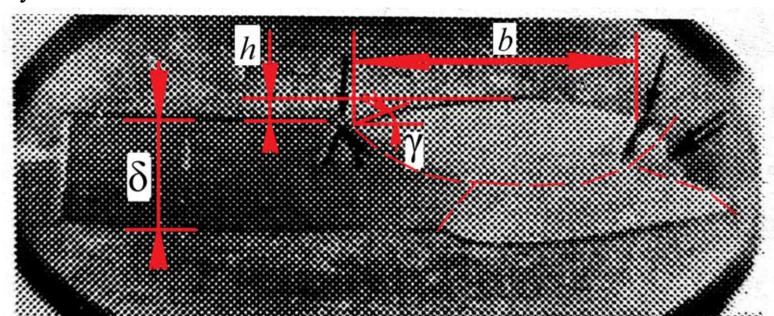


Рис. 2. Разрушение в сварном соединении трубы от концентрации напряжений в зоне сплавления. Сталь 14ХГС. Одинарной стрелкой показаны усталостные трещины; двойной — кромка разрыва трубы; штрихами — очертания сварного шва. Здесь b — ширина шва; h — высота шва; δ — толщина свариваемой детали; γ — угол перехода от основного металла к шву [9]

Теоретический коэффициент концентрации напряжений в зоне сплавления можно определить по формуле, учитывающей эффект концентрации от неплавного перехода в этой зоне [5]:

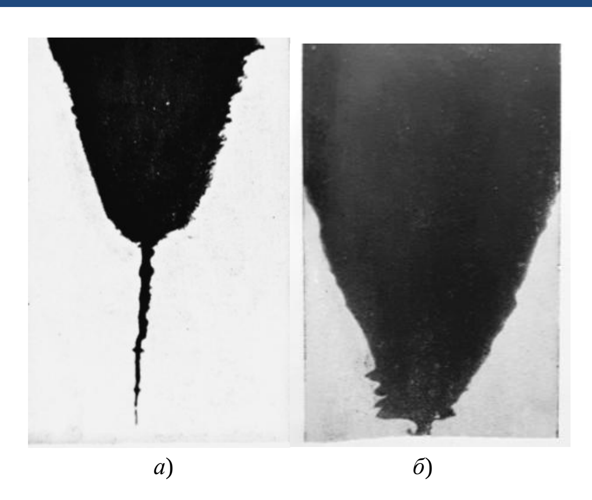
$$\alpha_т = 1 + 1{,}1h\frac{(b/\delta)^2+1}{\delta}\sqrt{h/\ln(90°/\gamma)}, \qquad (1)$$

где $\gamma = A[90\exp(-\rho/\rho_0) + B]$ — угол перехода от основного металла к шву; ρ — радиус перехода от основного металла к шву; $\rho_0 = 1$ мм; $A = 0{,}94 \ldots 0{,}17$; $B = 0{,}8$; b — ширина шва; h — высота шва; δ — толщина свариваемой детали (рис. 2).

Однако данная зависимость не учитывает измененные механические характеристики материала. В этих зонах обычно присутствуют закалочные структуры, механические характеристики которых могут значительно (до 30 %) отличаться от характеристик шва и основного металла.

Можно косвенно контролировать трещинообразование и напряженное состояние в области вершины концентратора напряжений через коэффициент концентрации их интенсивности. Так, при разрушении образца от усталости, в вершине концентратора образуется одна макротрещина, а в коррозионной среде — группа (рис. 3).

[3] Молоков К. А. *Оценка поврежденности феррито-перлитных сталей в условиях малоциклового нагружения*. В: Наука. Инновации. Техника и технологии: проблемы, достижения и перспективы : сб. тр. конф. Комсомольск-на-Амуре; 2015. С 125-128 URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=23752241&selid=46181945 (дата обращения: 31.10.2022).



а) *б*)

Рис. 3. Усталостное разрушение стали 45 от V-образного концентратора напряжений: *а* — на воздухе; *б* — в воде — коррозионной среде. Увеличение в 134 раза[4]

После образования группы макротрещин (рис. 3 *б*) роль макроконцентратора снижается, и дальнейшее развитие разрушения может быть приостановлено либо заторможено. Это подтвердили эксперименты, которые свидетельствуют о росте усталостной прочности в образцах с концентрацией напряжений в коррозионной среде[5]. Такая группа трещин как бы разрыхляет материал, изменяет напряженное состояние над поверхностью и под ней в вершине макроконцентратора, что препятствует образованию лидирующей трещины, способной развиваться далее при меньшем уровне циклических нагрузок.

Рассмотрим ситуацию на поверхности или в толще металла в массивных телах под напряжениями σ_H на бесконечности при плосконапряженном состоянии. В этом случае целесообразно использовать решение Колосова и Инглиса для концентратора эллиптической формы:

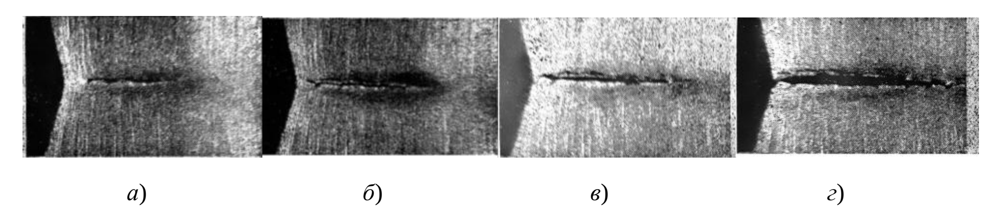
$$\alpha_T = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_H} = 1 + 2\sqrt{a/\rho}, \quad (2)$$

где ρ и σ_{max} — радиус кривизны и максимальная компонента напряжений на поверхности соответственно, в вершине выреза; a — большая полуось эллипса, или половина наибольшей длины области, перпендикулярной направлению поля внешней нагрузки.

Зависимость (2) хорошо согласовывается с инженерной практикой. В соответствии с принятой концепцией теоретический коэффициент концентрации напряжений у выреза определяется глубиной выреза и радиусом кривизны контура в его вершине, но не зависит от формы контура [15].

Благодаря развитию информационных технологий оценка теоретического коэффициента концентрации напряжений не представляет больших трудностей. Результаты по расчетам концентрации напряжений и деформаций в упругой и упругопластической постановке задачи можно получить средствами конечноэлементного анализа CAE [16–18, 12].

Эксперименты показали, что при определенной концентрации напряжений, внешней статической нагрузке и упругопластической стадии материала в вершине концентратора на некотором расстоянии от поверхности возникала начальная трещина разрушения. Она быстро распространялась к оси, перпендикулярной направлению растяжения пластин с надрезами. Распространение видно на снимках (рис. 4). Процесс зафиксирован в пластинах при плоском напряженном состоянии и при плоской деформации. В последнем случае появление трещины в толще металла под поверхностью выявили с помощью ультразвукового дефектоскопа.



а) *б*) *в*) *г*)

Рис. 4. Зарождение подповерхностной трещины в вершине концентратора при статическом растяжении: *а* — начало возникновения макротрещины; *б, в* —увеличение размера вглубь и к поверхности; *г* — выход трещины на поверхность [19]

[4] Молоков К. А. Оценка поврежденности феррито-перлитных сталей в условиях малоциклового нагружения.
[5] Сергеев Н. Н., Сергеев А. Н. Механические свойства и внутреннее трение высокопрочных сталей в коррозионных средах.

Таким образом, при указанных состояниях и достаточно остром концентраторе напряжений образуется зона многоосного напряженного состояния, в которой возможно нарушение сплошности. Здесь будет выше уровень наступления текучести, а предел прочности в ослабленном месте из-за концентратора может увеличиться до 20–60 % (это зависит от материала) [11].

Концентрация напряжений и условия напряженного состояния. Рассмотрим достаточно острые концентраторы напряжений с теоретическим коэффициентом концентрации $\alpha_т = 5 \dots 14$ и более. Как правило, в роли таких концентраторов выступают упомянутые выше дефекты. В вершине концентратора напряженное состояние можно рассматривать таким же, как при плоской деформации. В [18] приводятся результаты аналитического решения и экспериментальные данные для острых концентраторов при плоской деформации, устанавливается область допустимых значений $[\alpha_T]$ и радиус в вершине $[\rho]$ для стали 09Г2С. Однако не описано влияние ее механических характеристик. К тому же не ясно, основаны ли аналитические решения на таких исходных параметрах 09Г2С, как коэффициент упрочнения m, предел текучести $\sigma_{0,2}$, предел прочности σ_B, критическое сужение при разрушении φ_k и др. Известно, что пластичность и прочность существенно влияют на уровень допустимой концентрации напряжений и возникновение хрупкого разрушения в вершине.

Для упрочняющихся материалов циклические напряжения в вершине острого концентратора усугубляют возможность возникновения хрупкого разрушения, поэтому за критерий опасности примем такой α_T, при котором вероятно возникновение хрупкого разрушения в условиях статической нагрузки. Повышение максимальных напряжений в зависимости от числа циклов нагружения N задается аппроксимирующей формулой:

$$\sigma_{\max} = \sigma'_{\max} + A \cdot \lg(N), \tag{3}$$

где $\sigma'_{\max}$ — максимальное напряжение в концентраторе в первом полуцикле; A — коэффициент, зависящий от уровня исходной деформации и коэффициента асимметрии цикла нагружения в вершине концентратора.

Принимаем очевидное допущение, что появление хрупкого разрушения может быть обусловлено следующими причинами:

– усиление интенсивности трехмерного растяжения в непосредственной близости к вершине концентратора;

– увеличение сопротивления пластической деформации материала вблизи вершины как последствие сопротивления сдвигу в острых концентраторах напряжения.

Последнее обстоятельство оказывается тем сильнее, чем выше скорость нагружения и острее концентратор напряжений.

Рассмотрим упругопластическое плоское напряжение в вершине концентратора и упругое состояние в сечении брутто: $\sigma_{max} = \alpha_Т \sigma_Н \gg \sigma_{0,2}$, $\sigma_H \approx \sigma_{0,2}$ и $\sigma_H < \sigma_{0,2}$. Здесь $\sigma_{0,2}$ — условный предел текучести материала при одноосном растяжении. При $\alpha_т = 7{,}3$ жесткость напряженного состояния близка к состоянию для трещины. Коэффициент безопасности m_{FAD} для трещиноподобного дефекта при плоской деформации незначительно (в переделах 10 %) отличается от $\overline{m_{FAD}}$ для трещины, т. е. для такого состояния, когда имеет место приближенное равенство $m_{FAD} \approx \overline{m_{FAD}}$:

$$\frac{\sqrt{1-(\sigma_0/\sigma_T)^2/\alpha_T^2} \cdot \sqrt{1-\left(\sigma_{0,2}/n_T/\sigma_0\right)^2}}{\sqrt{1-(\sigma_0 n_T/\sigma_T)^2/\alpha_T^2} \cdot \sqrt{1-\left(\sigma_{0,2}/\sigma_0\right)^2}} \approx \frac{\sqrt{1-\left(\sigma_{0,2}/n_T/\sigma_0\right)^2}}{\sqrt{1-\left(\sigma_{0,2}/\sigma_0\right)^2}}. \tag{4}$$

Здесь n_T — коэффициент запаса по пределу текучести, σ_0 — локальная прочность материала у вершины трещины или острого концентратора.

В [11] термин «локальный предел текучести» применяется к острым концентраторам напряжения, когда примыкающая к вершине область концентратора испытывает сложное напряженное состояние (СНС). Очевидно, что этим термином обозначается напряжение течения материала на контуре концентратора. На поверхности в его вершине будет плоское напряженное состояние, под поверхностью возникнет трехосное СНС. Там резко возрастет жесткость напряженного состояния, поэтому начальное разрушение сплошности образуется на некотором расстоянии от поверхности (рис. 4). Установлено, что начало наступления локальной текучести в зоне концентратора напряжения не совпадает с уровнем, определенным расчетами по критериям прочности, в частности по Мизесу — Губеру — Генки. При увеличении концентрации напряжений возрастает разница между:

– величиной предела текучести $\sigma_{0,2}$, теоретически рассчитанной по этому критерию;

– экспериментально определенной величиной напряжения локального течения материала $\sigma^*_{0,2}$ в области, примыкающей к вершине концентратора.

Результаты экспериментов на плоских образцах разных сталей и сплавов [11, 16] показывают, что отношение $\sigma^*_{0,2}/\sigma_{0,2}$ хорошо аппроксимируется линейной зависимостью от α_T. Тогда условие текучести можно записать в виде:

$$\sigma_i = \sigma_{0,2}(0{,}9 + 0{,}1\alpha_т), \quad (5)$$

где σ_i — интенсивность напряжений по Мизесу.

Авторы ограничились экспериментальными исследованиями до значений $\alpha_T = 10$, и испытания проводились только на плоских образцах с центрально расположенными концентраторами. При плоской деформации жесткость напряженного состояния оказывается несколько выше. Поэтому логично предположить, что текучесть при некоторых значениях α_T наступала бы не раньше, чем при плоском напряженном состоянии. И вполне вероятно, что наклон прямой по уравнению (5) мог быть несколько иным [11]. Тем не менее, остановимся на этой зависимости.

Для момента начала текучести предположим, что с переходом от упругих деформаций к упругопластическим не меняется отношение второго и третьего главного напряжения к первому $\sigma_1 = \sigma_{\max}$. Это доказано экспериментально.

Приравняем к (5) интенсивность напряжений начала текучести по Мизесу согласно четвертой (энергетической) теории прочности и введем коэффициенты отношений между главными напряжениями при плоской деформации: $\sigma_1 = \sigma_i/D$; $\sigma_2 = q\sigma_1$; $\sigma_3 = \mu_T(1+q)\sigma_1$ [15]. Здесь $\mu_T = 0{,}5$ — коэффициент Пуассона в пластической области, а D — коэффициент перенапряжения, учитывающий повышение первого главного напряжения в случае СНС. У полученного относительно q уравнения два решения. Первое — для растягивающей σ_2 компоненты, второе — для сжимающей. Растягивающая компонента σ_2 увеличивает жесткость напряженного состояния в случае СНС. После преобразований и сокращений можем выразить ее так:

$$q = 1 - \frac{\sqrt{3}\sigma_{0,2}}{15\sigma_H}\left(1 + \frac{9}{\alpha_T}\right). \quad (6)$$

Для предельного случая $\sigma_H = \sigma_{0,2}$ можно пренебречь изменением радиуса в вершине концентратора и наступлением некоторой начальной глобальной текучести для сечения нетто. Тогда единственное значение α_T, удовлетворяющее жесткости эквивалентного трещине напряженного состояния, равно 7,3. Это подтверждает полученное ранее примерное равенство (4). Для других значений, как видно из (6), пропорциональность q будет меняться в зависимости от значения α_T и σ_H.

Для трещины коэффициент D определяется из условия равновесия в упругопластической области и вычисляется для плоской деформации по формуле:

$$D = \frac{(1+m)(1-2\mu)}{2}, \quad (7)$$

где m — коэффициент степенного упрочнения; μ — коэффициент Пуассона в упругой области.

Данный коэффициент для феррито-перлитных сталей принимает значения от 0,22 до 0,26.

Множитель перед D в формуле $q = 1 - 2D/\sqrt{3}$ для трещины составляет 1,156, а q для феррито-перлитных сталей — 0,73. Действительно, при подстановке $\alpha_T = 7{,}3$ (6) при $\sigma_H = \sigma_{0,2}$, получаем $q \cong 0{,}73$. Далее найдем α_T, если $\sigma_{0,2}/\sigma_H > 1$, при котором реализуется такое же напряженное состояние, как при $\alpha_T = 7{,}3$ и $\sigma_{0,2}/\sigma_H \to 1$.

В [20] исследовано влияние α_T на эффективный коэффициент концентрации напряжений $K_э$, а для типичного алюминиевого сплава показано, что в диапазоне α_T от 7 до 13 наблюдается глобальный экстремум значения $K_э$. Вполне вероятно, что такое существенное максимальное значение может свидетельствовать о хрупком разрушении на начальных этапах циклического нагружения или несплошности в вершине концентратора. В данном случае ресурс будет зависеть только от дальнейшей способности материала препятствовать распространению макротрещины.

Модель критического состояния в вершине острого макроконцентратора напряжений. Практически все дефекты сварного соединения трубопроводов, корпусных судовых конструкций и др. создают концентрацию напряжений. В [9] представлена аналитическая модель, разработанная на базе понятия «локальный коэффициент концентрации напряжений». Кроме того, получена простая зависимость на основе формулы Нейбера, связывающей теоретический обобщенный коэффициент концентрации и коэффициенты концентрации интенсивности упругих напряжений и деформаций. В итоге для критической величины пластичности в очаге концентратора получена следующая зависимость:

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_B \alpha_C^{2/(1+m)}}{E}, \quad (8)$$

где α_c — критическое значение теоретического коэффициента концентрации напряжений; σ_B — условный предел прочности; E — модуль упругости; m — показатель степенного упрочнения.

Зависимость (8) дает такие высокие значения, которые редко встречаются на практике. Например, при критической логарифмической деформации для стали 50 критический коэффициент концентрации — 26, а для высокопрочной стали 37ХН3А с $\sigma_B = 1014$ МПа — более 18. Можно заключить, что такая пластичность до нарушения сплошности в первых циклах нагружения недостижима. Это не удивительно, так как известно, что величина предельной пластичности для образцов с концентраторами напряжений существенно ниже, чем для

образцов без концентрации напряжений. Кроме того, ε_c должно определяться не только свойствами материала, но и условиями развития пластической деформации перед разрушением. Похожие результаты дает зависимость, используемая в [9]:

$$\alpha_T = \frac{\sqrt{E\cdot\varepsilon_{\text{разр}}\cdot\sigma_{\text{разр}}}}{\sigma_H}. \quad (9)$$

С. А. Куркин использовал ее для сравнительной оценки чувствительности материала к концентрации напряжений. Здесь α_T характеризует концентратор, в котором трещина возникает при конкретной нагрузке σ_H. Далее будем использовать для этого случая понятие «наиболее вероятное зарождение макротрещины в концентраторе» (born crack) α_T^{bc}. Истинные деформацию и напряжение в момент возникновения несплошности в вершине концентратора обозначим соответственно $\varepsilon_{\text{разр}}$ и $\sigma_{\text{разр}}$. Их можно определять по общепринятым формулам $\varepsilon_{\text{разр}} \cong \varepsilon_{\text{кр}} = \ln[1/(1-\varphi_{\text{к}})]$ и $\sigma_{\text{разр}} \cong S_{\text{отр}} = \sigma_{\text{в}}(1+1{,}4\varphi_{\text{к}})$. Здесь $S_{\text{отр}}$ — истинные напряжения разрушения при одноосном напряженном состоянии. Учтем, что текучесть в концентраторе наступает согласно (5). Заменим $\sigma_H = \sigma_{0,2}$ и $\sigma_{0,2}$ на $\sigma_{0,2}^*$. В итоге получим для критических состояний ($\alpha_T = \alpha_T^{bc}$) относительные напряжения зарождения разрушения $\sigma_{\text{н}}^{bc}/\sigma_{0,2}$ от концентратора:

$$\frac{\sigma_H^{bc}}{\sigma_{0,2}} = \frac{\sqrt{E\cdot\varepsilon_{\text{разр}}\cdot\sigma_{\text{разр}}}}{\alpha_T^{bc}(0{,}9+0{,}1\alpha_T^{bc})\sigma_{0,2}}. \quad (10)$$

Отметим, что при очень малом радиусе вершины концентратора ($\rho < 10d_z$, где d_z — средний диаметр зерна) распространение трещины ограничивается при неизменном α_T. Как показано в [6], это зависит от d_z стали. Формулы (8) и (9) привлекательны для инженера тем, что позволяют сравнивать чувствительность материалов к концентрации напряжений и использовать исходные данные механических характеристик стали.

Можно получить несколько иную модель, учитывающую СНС в области вершины макроконцентратора. Автор [12] использует силовой критерий хрупкого разрушения в материале конструкции $\sigma_1 > S_{\text{отр}}$, где $S_{\text{отр}}$ — напряжение нормального отрыва в приближении к одноосному напряженному состоянию. Важно, что данная характеристика материала не зависит от температуры его испытания. Используем этот критерий несколько иначе — для момента возникновения несплошности в области вершины концентратора напряжений. Полагаем, что $S_{\text{отр}}$ достижимо в случае постоянства энергетического равенства при СНС и одноосном напряженном состоянии, т. е. при потере пластической устойчивости и переходе от объемного напряженного состояния (когда σ_i мало) к одноосному напряженному состоянию с неизбежным возрастанием деформаций.

Используем степенную аппроксимацию диаграммы деформирования в рамках деформационной теории пластичности. Приравняем истинные напряжения σ_i диаграммы деформирования в функции упругого решения задачи $\sigma_i = F(\sigma_i^{(y)})$ к $S_{\text{отр}}$. В результате получим:

$$\sigma_i = \sqrt[\frac{1}{m}+1]{\sigma_{0,2}^{\frac{1}{m}-1}\left(\sigma_i^{(y)}\right)^2} = S_{\text{отр}} = \sigma_B(1+1{,}4\varphi_K), \quad (11)$$

где $\sigma_i^{(y)}$ — одноосные напряжения при упругом решении задачи.

Записывая (11) относительно $\sigma_i^{(y)}$, получим выражение для упругого решения задачи о концентрации напряжений с другой стороны: $\sigma_i^{(y)} = \alpha_T\cdot\sigma_H$. Таким образом:

$$\alpha_T\cdot\sigma_H = \sqrt{\frac{[\sigma_B(1+1{,}4\varphi_K)]^{\frac{1}{m}+1}}{\sigma_{0,2}^{\frac{1}{m}-1}}}. \quad (12)$$

Здесь σ_H — номинальная рабочая нагрузка на сварное соединение. В жестких точках сварных конструкций, соединений или при перегрузках она может достигать значения предела текучести материала. Представим частный случай в условиях циклического нагружения с упрочнением материала для момента образования несплошности born crack — зарождения разрушения. После преобразований (12) запишем упрощенную формулу:

$$\alpha_T^{bc} = \left[\frac{\sigma_B(1+1{,}4\varphi_K)}{\sigma_{0,2}^*}\right]^{\frac{1+m}{2m}}, \quad (13)$$

где α_T^{bc} — значение теоретического коэффициента концентрации напряжений, при котором происходит зарождение разрушения в области вершины макроконцентратора; $\sigma_{0,2}^*$ — предел текучести материала в вершине концентратора, который может повышаться согласно (5) в случае СНС.

В момент равенства $\alpha_T = \alpha_T^{bc}$ номинальные напряжения должны быть эквиваленты напряжениям зарождения (разрушения) σ_H^{bc}. Для этой ситуации можно записать в относительных значениях $\sigma_H^{bc}/\sigma_{0,2}$ и построить зависимости относительных значений напряжений образования разрушения от теоретического коэффициента концентрации $\alpha_T^{bc} = \alpha_T$:

$$\sigma_H^{bc} = \frac{2\cdot\left(\alpha_T^{bc}\right)^{\frac{-2m}{m+1}}\cdot\sigma_B\cdot(7\varphi_K+5)}{\alpha_T^{bc}+9}. \qquad (14)$$

К сожалению, не представляется возможным записать (14) относительно α_T^{bc} при $\sigma_H^{bc}/\sigma_{0,2} = 1$. Однако α_T^{bc} можно найти численно для конкретной нагрузки σ_H^{bc} или построить диаграммы опасности возникновения несплошностей в виде макротрещины в очаге концентратора.

Аналитически получены зависимости для расчета критических теоретических коэффициентов концентрации напряжений, связанных с механическими характеристиками материала и заданной внешней статической нагрузкой при условии возникновения объемного напряженного состояния для концентраторов в сварных соединениях. Показано, что объемность напряженного состояния в очаге концентратора существенно влияет на величину критического теоретического коэффициента концентрации напряжений. Установлено, что сложное напряженное состояние в очаге концентратора может контролироваться геометрическими характеристиками самого концентратора и его расположением относительно внешнего поля напряжений.

Экспериментальные данные сталей (таблица 1) получены из литературных источников. Это феррито-перлитные материалы, для которых формула (14) показала хорошее согласование. Зависимость (14) привлекательна тем, что в качестве исходных данных используются стандартные механические характеристики. Ее также можно применить для оценки опасности дефектов в зоне сплавления (рис. 1,2), где образуются закалочные структуры, свойства которых значительно отличаются от исходных характеристик свариваемой стали.

Решения по (9) и (14) применяются чаще для самых хрупких сталей при невысоких α_T^{bc}. Однако в области высокой концентрации напряжений критические отношения $\sigma_H^{bc}/\sigma_{0,2}$ для разных сталей будут весьма близки по значениям. Это можно объяснить тем, что при СНС в области вершины для всех сталей создается напряженное состояние, подобное опасному случаю. В области же малых концентраций напряжений решения по модели (9) показывают более высокие критические значения напряжений σ_H^{bc}. Отметим, что среднее значение α_T^{bc} при $\sigma_H^{bc} \approx \sigma_{0,2}$ составляет ~8,5. Для разных по механическим характеристикам сталей оно меняется не так значительно, как по расчетным результатам модели (9).

Рис. 5 построен для проверки результатов расчетов по физической адекватности модели (14). Это графики зависимостей критического состояния $\sigma_H^{bc}/\sigma_{0,2}$ от α_T^{bc}.

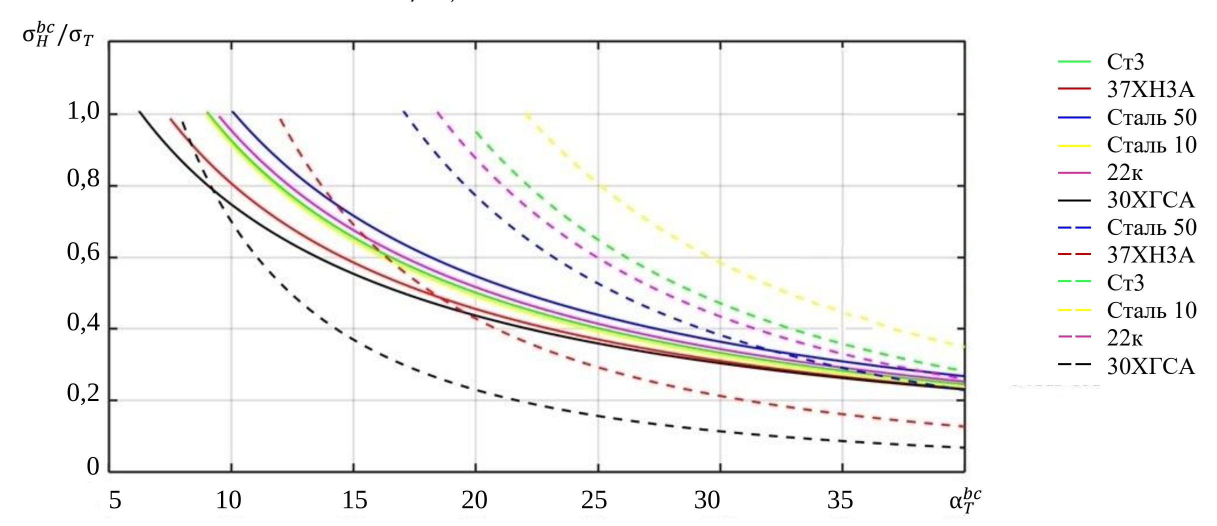


Рис. 5. Зависимости изменения относительного напряжения внешней нагрузки $\sigma_H^{bc}/\sigma_{0,2}$ от α_T^{bc} для критического состояния в вершине концентратора напряжений. Сплошные кривые рассчитаны по формуле 14; пунктирные — формула (10)

Модель (9), не учитывающая объемность и повышение напряжений текучести в вершине концентратора, для стали 10 дает $\alpha_T^{bc} = 91$ при напряжениях $\sigma_H^{bc} = 0{,}5\sigma_{0,2}$, что маловероятно. Если учитывать объемность в этой модели, то $\alpha_T^{bc} = 33$, что существенно меньше. При учете объемности напряженного состояния критическая пластическая деформация снижается до возникновения разрушения при статическом растяжении образцов. Это подтвердили эксперименты с различными сталями и сплавами[6]. Более того, на корродированных образцах исследователи получали меньшую пластичность сталей. При этом было показано, что в вершинах создается объемное напряженное состояние, и объемность препятствует свободному протеканию пластичности. Пластичность до разрушения этих образцов составляла ~40 %, а предел текучести повышался до 27 % [21]. Можно заключить, что более глубокие концентраторы обусловливают большее повышение предела текучести.

[6] Кроха В.А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации. Москва; 1980. 157 с.

Результаты косвенных опытов позволяют утверждать, что при гидростатической нагрузке текучесть не фиксируется, в этом случае материал разрушается только хрупко. Однако в очаге концентратора при увеличении внешней нагрузки объемное напряженное состояние не может оставаться достаточно стабильным для развития более высокого уровня объемности. Поэтому бифуркация неизбежна. Далее развитие может пойти по двум направлениям:

– хрупкое разрушение или его зачатки в очаге;

– потеря устойчивости напряженного состояния и, как следствие, переход к резкому возрастанию пластических деформаций.

Вероятно, момент бифуркации следует считать критическим состоянием в очаге концентратора. Возможно, этот момент значительно зависит от глубины концентратора, его относительной длины и глубины к толщине детали, ориентации к внешнему полю напряжений, а также от механических характеристик и протяженности очага концентратора. Все это требует дополнительных исследований и более точных решений.

Обсуждение и заключения. Дефекты и конструктивные особенности сварных соединений (форма разделки кромок, непроплавление, подрезы, поры, закалочные структуры и др.) снижают статическую и усталостную прочность. Для сварных соединений типичны концентраторы напряжений, имеющие длинную и неглубокую форму по отношению к толщине соединяемых деталей (подрезы) или длинную и глубокую (непроплавления и др.). Все они снижают усталостную прочность. Аналитические модели, полученные в представленной работе, позволяют сделать ряд заключений.

1. Работа материала при высоких значениях теоретического коэффициента концентрации напряжений зависит от напряженного состояния и его жесткости, а также от механических и структурных характеристик. Последние могут отличаться от параметров исходного материала, так как вершины концентраторов могут находиться в зонах сплавления сварных соединений.

2. Жесткое напряженное состояние в очаге концентратора напряжений может привести к повышению предела текучести. В этом случае прохождение сдвиговой деформации сдерживается, а наступление предельного состояния достигается при меньшем значении теоретического коэффициента концентрации напряжений и характеризуется несплошностью при постоянном значении внешней нагрузки.

3. Сравнение высокопрочных сталей с пластичными и сталями обычной прочности при одном и том же уровне $\sigma_H^{bc}/\sigma_{0,2}$ дает следующие результаты. Во втором случае образование объемности напряженного состояния будет более существенно сказываться на изменении критического значения теоретического коэффициента концентрации напряжений, при котором происходит зарождение разрушения в области вершины макроконцентратора α_T^{bc} (рис. 5).

4. Сравнение моделе (14) и (10) позволяет сделать определенный вывод. С учетом жесткости напряженного состояния и повышения предела текучести при $\sigma_H^{bc}/\sigma_{0,2} \to 1$ снизу (10) дает оценку α_T^{bc} с запасом по прочности, если речь идет о $\sigma_H^{bc}/\sigma_{0,2} = 0{,}8$ (30ХГСА). Для менее прочной стали (14) запас по прочности при $\sigma_H^{bc}/\sigma_{0,2} = 0{,}5$ (37ХН3А) и т. д. Таким образом, предпочтительнее учитывать объемность и использовать модель (14).

5. Зависимости на диаграмме теоретических коэффициентов напряжений более плотно сгруппированы в (14), чем в (10) из-за очень похожих напряженных состояний в области вершин острых концентраторов напряжений. Поэтому механические характеристики сталей оказывают второстепенное влияние на α_T^{bc}.

6. При увеличении теоретического коэффициента концентрации напряжений и уменьшении α_T^{bc} при одном уровне $\sigma_H^{bc}/\sigma_{0,2}$ внешней нагрузки снижается влияние структурного фактора в стали на возникновение начального разрушения (образование несплошности). Однако для дальнейшего разрушения существенное значение будет иметь сопротивляемость материала росту макротрещины. После ее возникновения срабатывают другие критерии механики и кинетики разрушения.

Представленное исследование может служить предпосылкой к разработке аналитических моделей для оценки остаточного ресурса сварных соединений и конструкций, подверженных действию циклических нагрузок. Дальнейшие изыскания, предположительно, уточнят аналитические модели. Авторы проверят и апробируют результаты путем моделирования средствами CAE и перейдут к оценке эффективных коэффициентов концентрации напряжений.

Список литературы

1. Молоков К.А., Новиков В.В., Турмов Г.П. и др. Оценка надежности судовых конструкций с микротрещинами и остаточными сварочными напряжениями. *Морские интеллектуальные технологии.* 2018;1(3):45–54.

2. Новиков В.В., Турмов Г.П., Суров О.Э. и др. *Повреждения и расчетный анализ прочности корабельных конструкций.* Владивосток: Дальневосточный федеральный университет; 2020. 266 с.

3. Ерофеев В.В., Игнатьев А.Г., Олейник Н.И. и др. Математическая модель для оценки коэффициентов концентрации напряжений в сварных тавровых соединениях. *Информационные технологии. Проблемы и решения*. 2021;(4):28–36.

4. Молоков К.А., Сахарова А.В., Михалев М.В. Оценка пределов выносливости сварных соединений по критерию распространяющихся трещин. *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета.* 2017;30(1):42–51. https://doi.org/10.5281/zenodo.399005

5. Казанов Г.Т., Новиков В.В., Турмов Г.П. *Концентрация напряжений и другие особенности напряженного состояния судовых корпусных конструкций.* Владивосток: Дальневосточный федеральный университет; 2014. 178 с.

6. Молоков К.А., Новиков В.В., Турмов Г.П. и др. *Математические модели оценки эксплуатационного ресурса и работоспособности судовых сварных конструкций.* Владивосток: Дальневосточный федеральный университет; 2021. 240 с.

7. Емельянов О.В., Шаповалов Э.Л., Гаврилов В.Б. Уровень концентрации упругих напряжений в стыковых сварных соединениях в зависимости от конструктивных. *БСТ: Бюллетень строительной техники.* 2017;11:26–28.

8. Махутов Н.А., Албагачиев А.Ю., Алексеевна С.И. и др. *Прочность, ресурс, живучесть и безопасность машин*. Москва: Либроком; 2008. 576 с.

9. Ямалеев К.М., Гумерова Л.Р. *Структурные аспекты разрушения металла нефтепроводов.* Уфа: Гилем; 2011. 144. с.

10. Хажинский Г.М. *Деформирование. Разрушение. Надежность: Задачи деформирования и разрушения стали. Методы оценки прочности энергетического оборудования и трубопроводов.* Москва: Ленанд; 2014. 544 с.

11. Ларионов В.П., Филиппов В.В. *Хладостойкость материалов и элементов конструкций: результаты и перспективы.* Новосибирск: Наука; 2005. 290 с.

12. Крыжевич Г.Б. Методы расчета предельной и усталостной прочности конструкций морской техники в низкотемпературных условиях. *Труды Крыловского государственного научного центра.* 2019;2:41–54. http://doi.org/10.24937/2542-2324-2019-2-388-41-54

13. Смирнов А.Н., Муравьев В.В., Абабков Н.В. *Разрушение и диагностика металлов.* Москва: Инновационное машиностроение; 2016. 479 с.

14. Негода Е.Н. Усталость сварных соединений труб большого диаметра. *Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального университета.* 2015;4:62–74.

15. Матохин Г.В., Горбачев К.П. *Инженеру о сопротивлении материалов разрушению.* Владивосток: Дальнаука; 2010. 281. с.

16. Митенков Ф.М., Волков И.А., Игумнов Л.А. и др. *Прикладная теория пластичности*. Москва: Физматлит; 2015. 284 с.

17. Левин В.А., Вершинин А.В. *Нелинейная вычислительная механика прочности. Т. 2. Численные методы.* Москва: Физматлит; 2015. 544 с.

18. Матвиенко Ю.Г. *Двухпараметрическая механика разрушения.* Москва: Физматлит; 2021. 208 с.

19. Панферов В.М. Концентрация напряжений при упругопластических деформациях. *Известия академии наук СССР. Отделение технических наук. Механика и машиностроение*. 1954;(4):47–65.

20. Бьюи Х.Д. *Механика разрушения: обратные задачи и решения*. Москва: Физмалит; 2011. 412 с.

21. Петрова Н.Е., Баева Л.С. Биокоррозия корпусов судов. *Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета*. 2006;9(5):890–892.

References

1. Molokov KA, Novikov VV, Turmov GP, et al. Estimation of Reliability of Ship Structures with Microcracks and Residual Welding Stresses. *Marine Intellectual Technologies*. 2018;41:45–54.

2. Novikov VV, Turmov GP, Surov OE, et al. *Povrezhdeniya i raschetnyi analiz prochnosti korabel'nykh konstruktsii*. Vladivostok: Far Eastern Federal University; 2020. 266 p. (In Russ.)

3. Erofeev VV, Ignatiev AG, Oleinik NI, et al. Mathematical Model for Assessing Stress Concentration Factors in T-Shaped Welded Joints. *Information Technology*. 2021;17:28–36.

4. Molokov K, Sakharova A, Mikhalev M. Crack Propagation-Based Assessment of the Endurance Limits of Welded Joints. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2017;30:42–51. https://doi.org/10.5281/zenodo.399005

5. Kazanov GT, Novikov VV, Turmov GP. *Kontsentratsiya napryazhenii i drugie osobennosti napryazhennogo sostoyaniya sudovykh korpusnykh konstruktsii*. Vladivostok: Far Eastern Federal University; 2014. 178 p. (In Russ.)

6. Molokov KA, Novikov VV, Turmov GP, et al. *Matematicheskie modeli otsenki ehkspluatatsionnogo resursa i rabotosposobnosti sudovykh svarnykh konstruktsii*. Vladivostok: Far Eastern Federal University; 2021. 240 p. (In Russ.)

7. Emelianov OV, Shapovalov EL, Gavrilov VB. The Level of Concentration of Elastic Stresses in Butt Welded Connections Depending on Design Parameters. *BST: Byulleten' stroitel'noi tekhniki*. 2017;999:26–28.

8. Makhutov NA, Albagachiev AYu, Alekseeva SI, et al. *Prochnost', resurs, zhivuchest' i bezopasnost' mashin*. Moscow: Librokom; 2008. 576 p. (In Russ.)

9. Yamaleev KM, Gumerova LR. *Strukturnye aspekty razrusheniya metalla nefteprovodov*. Ufa: Gilem; 2011. 144 p. (In Russ.)

10. Khazhinskiy GM. *Deformirovanie. Razrushenie. Nadezhnost': Zadachi deformirovaniya i razrusheniya stali. Metody otsenki prochnosti ehnergeticheskogo oborudovaniya i truboprovodov*. Moscow: Lenand; 2014. 544 p. (In Russ.)

11. Larionov VP, Filippov VV. *Khladostoikost' materialov i ehlementov konstruktsii: rezul'taty i perspektivy*. Novosibirsk: Nauka; 2005. 290 p. (In Russ.)

12. Kryzhevich GB. Limit and Fatigue Strength Calculation Methods for Arctic Marine Structures. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2019;388:41–54. http://doi.org/10.24937/2542-2324-2019-2-388-41-54.

13. Smirnov AN, Muravyev VV, Ababkov NV. *Razrushenie i diagnostika metallov*. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie; 2016. 479 p. (In Russ.)

14. Negoda EN. Fatigue of Welded Joints of Large Diameter Pipes. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2015;25:62–74.

15. Matokhin GV, Gorbachev KP. *Inzheneru o soprotivlenii materialov razrusheniyu*. Vladivostok: Dal'nauka; 2010. 281 p. (In Russ.)

16. Mitenkov FM, Volkov IA, Igumnov LA, et al. *Prikladnaya teoriya plastichnosti*. Moscow: Fizmatlit; 2015. 284 p. (In Russ.)

17. Levin VA, Vershinin AV. Nelineinaya vychislitel'naya mekhanika prochnosti. Vol. 2. *Chislennye metody*. Moscow: Fizmatlit; 2015. 544 p. (In Russ.)

18. Matvienko YuG. *Dvukhparametricheskaya mekhanika razrusheniya*. Moscow: Fizmatlit; 2021. 208 p. (In Russ.)

19. Panferov VM. Kontsentratsiya napryazhenii pri uprugoplasticheskikh deformatsiyakh. *Izvestiya akademii nauk SSSR. Otdelenie tekhnicheskikh nauk. Mekhanika i mashinostroenie*. 1954;4:47–65. (In Russ.)

20. Huy Duong Bui. *Fracture Mechanics: Inverse Problems and Solutions*. Moscow: Fizmatlit; 2011. 412 p. (In Russ.)

21. Petrova NE, Baeva LS. Biokorroziya korpusov sudov. *Vestnik of MSTU. Proceedings of MSTU*. 2006;9:890–892. (In Russ.)

Об авторах:

Молоков Константин Александрович, доцент Департамента промышленной безопасности, Политехнический институт Дальневосточного федерального университета (690091, РФ, г. Владивосток, ул. Суханова, 8), доцент кафедры «Информационные технологии и системы» Владивостокского государственного университета (690014, РФ, г. Владивосток, ул. Гоголя, 41), кандидат технических наук, ScopusID, ORCID, Spektrum011277@gmail.com

Новиков Валерий Васильевич, доцент Департамента морской техники и транспорта, Политехнический институт Дальневосточного федерального университета (690091, РФ, Владивосток, ул. Суханова, 8), кандидат технических наук, ScopusID, ORCID

Дабалез Мохаммад, магистрант Департамента промышленной безопасности, Политехнический институт, Дальневосточного федерального университета (690091, РФ, Владивосток, ул. Суханова, 8), ORCID, dabalez.mo@students.dvfu.ru

Заявленный вклад соавторов

К.А. Молоков — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, начальная версия основного текста, формулирование выводов. В.В. Новиков — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка выводов и основного текста. М. Дабалез — работа с источниками, оформление графических материалов.

Поступила в редакцию 30.12.2022.
Поступила после рецензирования 16.01.2023.
Принята к публикации 18.01.2023.

Конфликт интересов
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Konstantin A Molokov, associate professor of the Department of Industrial Safety, Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University (8, Sukhanova St., Vladivostok, 690091, RF), associate professor of the Information Technologies and Systems, Vladivostok State University (41, Gogoleva St., Vladivostok, 690014, RF), Cand.Sci. (Eng.), ScopusID, ORCID, Spektrum011277@gmail.com

Valery V Novikov, associate professor of the Department of Marine Engineering and Transport, Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University (8, Sukhanova St., Vladivostok, 690091, RF), Cand.Sci. (Eng.), ScopusID, ORCID

Mohammad Dabalez, graduate student of the Department of Industrial Safety, Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University (8, Sukhanova St., Vladivostok, 690091, RF), ORCID, dabalez.mo@students.dvfu.ru

Claimed contributorship:
KA Molokov: basic concept formulation; research objectives and tasks; computational analysis; initial version of the body text; formulation of conclusions. VV Novikov: academic advising; analysis of research results; revision of conclusions and the body text. M Dabalez: work with sources; design of graphic materials.

Received 30.12.2022.
Revised 16.01.2023.
Accepted 18.01.2023.

Conflict of interest statement
The authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.